

О НЕКОТОРЫХ ПУТЯХ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФОРКАМЕРНОГО ДВС

И.В. Кузнецов, А.А. Шейпак



**ШЕЙПАК
Анатолий
Александрович**

Профессор кафедры «Электротехника, теплотехника, гидравлика и энергетические машины» Московского государственного индустриального университета (МГИУ), доктор технических наук. Академик Российской академии транспорта, профессор и действительный член Международной академии наук Сан-Марино, действительный член Международной академии наук и искусств. Заместитель председателя Научно-методического совета по теплотехнике, член Научно-методического совета по механике и председатель Научно-методической комиссии по гидравлике Министерства образования и науки Российской Федерации. Специалист в области термодинамики и теплотехники, гидравлических и тепловых машин различного назначения. Автор более 200 научных работ, в том числе трех монографий, учебника, 40 изобретений.

Введение

Несмотря на более чем 100-летнее использование двигатель внутреннего сгорания (ДВС) остается наиболее экономичной тепловой машиной.

Реальные конкуренты ДВС как силовой установки для автомобиля, ряд ли будут найдены в обозримом будущем. Бензиновые ДВС, характеризующиеся относительно низкой стоимостью и простотой обслуживания, высокой удельной мощностью и малой удельной массой, хорошими пусковыми качествами, сохранят и в будущем свое доминирующее положение.



**КУЗНЕЦОВ
Игорь
Валентинович**

Кандидат технических наук. Ведущий научный сотрудник НПП «Агродизель». Автор 57 научных трудов и 33 изобретений. Специалист в области тепловых двигателей.

ние в производстве легковых автомобилей. В связи с этим, а также с учетом того, что автомобильный транспорт является одним из основных источников загрязнения окружающей среды и потребителем топлива, проблеме улучшения топливной экономичности автомобильных ДВС при введении все более жестких норм на ограничение выбросов вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) с каждым годом придается все большее значение.

Задача улучшения топливной экономичности при снижении содержания в отработавших газах монооксида углерода CO, углеводородов CH и оксидов азота NO, NO₂, N₂O₅ и пр. (далее NO_x) может быть решена при использовании на автомобилях бензиновых ДВС, работающих на бедных смесях. В частности, это касается форкамерных ДВС, работающих на топливовоздушных смесях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha \geq 1,2$.

Процесс смесеобразования в форкамерном ДВС был предложен учеными Института химической физики РАН им. Н.Н. Семенова, а его конструктивная реализация была осуществлена специалистами Горьковского автомобильного и Заволжского моторного заводов. На последнем было освоено производство форкамерного ДВС ЗМЗ-4022.10 для автомобиля ГАЗ-3102, основные характеристики которого представлены в табл. 1.

Применение каталитического нейтрализатора

Для получения сравнительных экономических и экологических показателей автомобилей, оборудованных обычным искровым и форкамерным ДВС, были проведены их испытания. При этом двигатели устанавливались на автомобиль, испытываемый на стенде с беговыми барабанами. Кроме того, исследования должны были определить перечень работ, выполнение которых позволило бы улучшить экономические и экологические показатели форкамерного ДВС в связи с введением в ездовой цикл Европейского экономического сообщества (ЕЭС) требования к пуску автомобиля при температуре минус 7 °С.

Объектом для сравнительных испытаний был выбран автомобиль «Волга», попеременно оборудованный форкамерным ДВС ЗМЗ-4022.10 со степенью сжатия $\epsilon = 7,0$ и обычным искровым ДВС ЗМЗ-4021.10 при $\epsilon = 6,7$. Причем, испытания проводились по ездовому циклу Правил Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН). Автомобиль проходил испытания как без каталитического нейтрализатора (КН), так и с каталитическим нейтрализатором в системе выпуска отработавших газов ДВС [1].

В процессе испытаний автомобиль выполнял программу, состоящую из четырех оди-

Таблица 1

Технические характеристики форкамерного ДВС ЗМЗ-4022.10

Характеристика	Значение, тип
Ход поршня, S, мм	92
Диаметр цилиндра, D, мм	92
Рабочий объем двигателя, V _л , дм ³	2,445
Порядок работы цилиндров	1 – 2 – 4 – 3
Тип основной камеры сгорания	Плоскоовальная
Суммарный объем форкамер, V _ф , дм ³	0,015
Диаметр сопловых каналов в форкамере, d _с , мм	3,5
Количество сопловых каналов в форкамере	2, расположены под углом 50° друг к другу
Средняя степень сжатия ДВС, ϵ	8,36
Карбюратор	K-156
Диаметр диффузора в первичной камере, мм	28
Диаметр диффузора во вторичной камере, мм	32
Диаметр форкамерной полости карбюратора, мм	10
Длина шатуна, L, мм	168
Количество свечей зажигания	4, А-14Д

наковых фаз, непрерывно повторяющихся одна за другой, и совершал пробег, равный 1,01 км за одну фазу цикла. За ездовой цикл испытания автомобиля отработавшие газы двигателя собирали в эластичные емкости, из которых их затем выкачивали через газовые счетчики для определения объема и осредненных значений концентрации токсичных компонентов. Зная объем отработавших газов и концентрации компонентов, вычисляли их массовые выбросы –

«грамм за испытание» или, учитывая пробег автомобиля при испытании, «грамм на километр».

Испытания по циклу ЕЭК ООН показали, что расход топлива G_T на 100 км пробега автомобиля с форкамерным ДВС на 10 % меньше по сравнению с расходом топлива автомобилем, оборудованным обычным искровым ДВС, а выбросы вредных веществ с отработавшими газами также стали меньше: в 5,6 раза по CO, в 1,6 раза по CH и в 2,8 раза по NO_x (табл. 2).

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний автомобиля «Волга»

Тип ДВС и наличие КН		Выбросы вредных веществ, г/испытание			G_T , л/100 км
		CO	CH	NO _x	
Без каталитического нейтрализатора	Форкамерный	9,3	7,2	3,3	13,8
	Искровой	52	11,7	9,2	15,3
С каталитическим нейтрализатором	Форкамерный	1,0	0,76	1,07	15,3
	Искровой	12,3	2,0	7,3	16,0

Кроме того, при наличии каталитического нейтрализатора расход топлива автомобиля с форкамерным ДВС стал меньше расхода топлива автомобиля с искровым ДВС и КН на 5 %, а выбросы вредных веществ с отработавшими газами автомобиля с форкамерным ДВС и КН по сравнению с выбросами автомобиля с искровым ДВС и КН стали меньше по CO в 12 раз, по CH – в 2,6 раза и по NO_x – в 6,8 раза. В итоге получено, что каталитический нейтрализатор, установленный в систему выпуска автомобиля «Волга» с форкамерным ДВС, увеличивает расход топлива автомобилем приблизительно на 10 %, но снижает содержание в отработавших газах CO и CH более чем в 9 раз, а NO_x – в 3 раза.

В настоящее время в России для испытаний автомобилей принят ездовой цикл ЕЭС. (В отличие от правил ездового цикла ЕЭК ООН ездовой цикл ЕЭС включает дополнительную пятую фазу длиной приблизительно 7,2 км, на которой имитируется разгон и езда автомобиля со скоростью приблизительно равной 120 км/ч, а также требования к пуску автомобиля при температуре минус 7 °С.) Для выполнения этих требований были проведены исследования по циклу ЕЭС процесса смесеобразования и сис-

темы нейтрализации отработавших газов у форкамерного ДВС с каталитическим нейтрализатором.

Методика проведения исследований заключалась в отдельном определении выбросов вредных веществ по фазам выполнения ездового цикла ЕЭС. Разделение ездового цикла на фазы необходимо, чтобы установить в общем выбросе вредных веществ ту долю, которую вносит фаза с относительно «холодными» ОГ, и долю скоростной фазы.

Испытания автомобиля «Волга» с форкамерным ДВС ЗМЗ-4022.10 и каталитическим нейтрализатором по ездовому циклу ЕЭС показали, что при выполнении автомобилем первой «холодной» фазы ездового цикла, когда ДВС и нейтрализатор не прогреты до рабочих температур, доля этой фазы в общих выбросах вредных веществ составляет по CO более 70 % и по CH более 45 % (табл. 3).

Относительно «холодный» пуск и использование нейтрализатора мало влияют на выбросы NO_x, поскольку форкамерный ДВС работает на бедных смесях. Более 52 % в суммарные выбросы NO_x при выполнении автомобилем ездового цикла вносит скоростная добавка. Это указывает на то, что для выполнения

Результаты исследований автомобиля «Волга»
с каталитическим нейтрализатором по циклу ЕЭС

Фазы цикла, суммарные, удельные и нормируемые выбросы		Выбросы вредных веществ, г/испытание		
		СО	СН	NO _x
Цикл ЕЭК ООН	1	3,15	0,14	1,14
	2, 3, 4	0,2	0,11	3,0
Суммарные выбросы за 4 фазы		3,35	0,25	4,14
За 5-ю фазу (скоростная добавка)		1,05	0,05	4,5
Суммарные выбросы за испытание		4,4	0,3	8,64
Выбросы за цикл ЕЭС, г/км		0,39	0,03	0,77
Выбросы по нормам ЕВРО-4, г/км		1,00	0,1	0,08

требований перспективных норм необходимо существенно обеднить смеси, на которых эффективно работает форкамерный ДВС.

Для определения путей ускоренного прогрева нейтрализатора, а значит возможностей снижения СО, СН и NO_x в относительно «холодных» отработавших газах, были проведены исследования форкамерного ДВС ЗМЗ – 4022.10 ($\epsilon = 7,0$) с каталитическим нейтрализатором при подводе водорода в нейтрализатор [2].

При проведении исследований был использован нейтрализатор объемом 2 л, в корпус коотрого был установлен блочный керамический элемент с катализатором из металлов: Pt = 50 %, Ru = 25 % и Rh = 25 % (платино-рутениево-родиевый катализатор).

Методика проведения исследований ДВС заключалась в получении регулировочных характеристик содержания в отработавших газах СО, СН и NO_x, а также их температуры T_H после нейтрализатора в зависимости от общего коэффициента избытка воздуха α_z в смеси, поступающей в ДВС при различных расходах водорода в каталитический нейтрализатор. Состав смеси с коэффициентом α_z при испытании изменяли путем регулирования топлива в смеси, поступающей в цилиндры ДВС.

Состав отработавших газов измерялся следующими приборами: СО – газоанализатором «Бекман 865», СН – «Бекман 402», NO_x – «Бекман 951». Пробы отработавших газов отбирались на газоанализаторы из выпускной трубы по трубопроводу «горячей» линии. Как принято в двигателестроении, концентрация в отработавших газах СО оценивалась в процентах по

объему, а меньшие концентрации СН и NO_x – количеством их частей на миллион (млн⁻¹).

При проведении эксперимента каталитический нейтрализатор был вынесен из моторного бокса на расстояние примерно 10 м от среза выпускной трубы ДВС, а водород поступал в отработавшие газы приблизительно в 1 м перед нейтрализатором.

Из схемы испытательного стенда, приведенной на рис. 1, видно, что водород в нейтрализатор 22 подводился по магистралям через дозирующее устройство, которое состояло из баллона 1 с водородом, соединенного через редуктор 2 высокого давления и электромагнитный клапан 3 с магистралью 4, в которой установлен манометр 25. Магистраль 4 подсоединена к измерительной емкости 5 объемом $V_{и}$. Измерительная емкость 5 соединена через редуктор 6 стабилизации расхода и манометр 7 с ресивером 8, имеющим регулировочный вентиль 9. Редуктор 6 предназначен для поддержания избыточного давления в ресивере 8 и обеспечения постоянного расхода водорода в каталитический нейтрализатор 22.

Для измерения расхода водорода открывали клапан 3 и с помощью редуктора 2 устанавливали давление 0,8-0,9 МПа в магистрали 4. После этого клапан 3 закрывали и определяли время $t_{и}$, за которое давление в емкости 5 уменьшится на величину Δp_{H_2} . Расход водорода, поступающего в нейтрализатор, вычисляли по формуле:

$$G_{H_2} = \frac{60 \cdot \Delta p_{H_2} \cdot V_{и} \cdot \rho_{H_2}}{1000 \cdot t_{и}},$$

где ρ_{H_2} – плотность водорода.

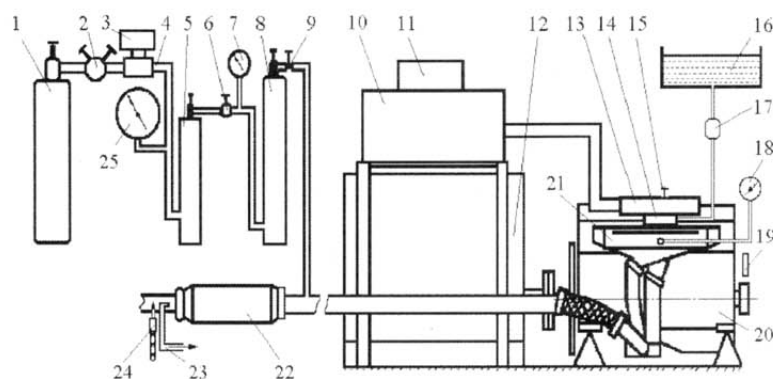


Рис. 1. Схема моторного стенда:

1 – баллон с водородом; 2 – редуктор; 3 – электромагнитный клапан; 4 – магистраль; 5 – измерительная емкость; 6 – редуктор стабилизации расхода водорода; 7, 25 – анометры; 8, 10 – ресиверы; 9 – регулировочный вентиль; 11 – расходомер воздуха; 12 – тормозная установка; 13 – воздушный фильтр; 14 – карбюратор; 15 – регулировочная игла для изменения расхода топлива, поступающего в цилиндры; 16 – топливный бак; 17 – расходомер топлива; 18 – вакуумметр; 19 – стробоскоп; 20 – ДВС; 21 – впускная труба ДВС; 22 – каталитический нейтрализатор; 23 – «горячая» линия отбора проб отработавших газов на газоанализаторы; 24 – термопара

В ходе эксперимента с помощью тормозной установки 12 устанавливали частоту вращения n коленчатого вала ДВС 20, угол опережения зажигания θ определяли в градусах поворота коленчатого вала и измеряли при помощи стробоскопа 19. Разрежение Δp во впускной трубе 21 измерялось вакуумметром 18. С помощью регулировочной иглы 15 устанавливали расход топлива через ДВС, при котором в отработавших газах содержание CO составляло 2-4 %, и проводили измерение температуры T_H с помощью термопары 24, а также содержание CH и NO_x в отработавших газах, которые поступали в газоанализаторы по «горячей» линии 23. Топливо поступало из топливного бака 16, и его расход измеряли с помощью расходомера 17, а расход воздуха – с помощью расходомера воздуха 11. По расходам топлива и воздуха определялся общий коэффициент избытка воздуха α_{Σ} в смеси, поступающей в ДВС. Последовательно уменьшая расход топлива с помощью иглы 15, получали регулировочные характеристики для T_H , CO, CH и NO_x .

На рис. 2 показаны регулировочные характеристики содержания в отработавших газах CO, CH и NO_x , а также температуры T_H в зависимости от общего коэффициента избытка воз-

духа α_{Σ} при работе форкамерного ДВС на режиме с частотой вращения вала $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $\Delta p = 40 \text{ КПа}$ и $\theta = 14^\circ$.

При работе ДВС без подвода водорода температура T_H была приблизительно 170°C , при которой практически не происходит снижение вредных веществ в каталитическом нейтрализаторе.

При увеличении расхода водорода в нейтрализаторе увеличивается температура T_H и активность катализатора, что особенно заметно для обедненной смеси с коэффициентом α_{Σ} . При этом содержание в отработавших газах как CO, так и CH, в каталитическом нейтрализаторе значительно снижается. Однако если снижение CH в значительной мере определяется температурой T_H и наличием в отработавших газах кислорода, то на снижение CO после нейтрализатора оказывает влияние расход водорода.

Малые температуры в нейтрализаторе и отсутствие подвода водорода практически не влияют на степень очистки NO_x в отработавших газах. Подвод водорода значительно видоизменяет характер изменения содержания NO_x в отработавших газах после прохождения нейтрализатора. Особенно это проявляется при

работе ДВС на смесях, близких к стехиометрическому ($\alpha_{\Sigma} \approx 1,0$), где при увеличении расхода водорода в нейтрализаторе расширяются возможности восстановительных реакций на катализаторе и происходит снижение NO_x после нейтрализатора до концентрации 10-20 млн^{-1} .

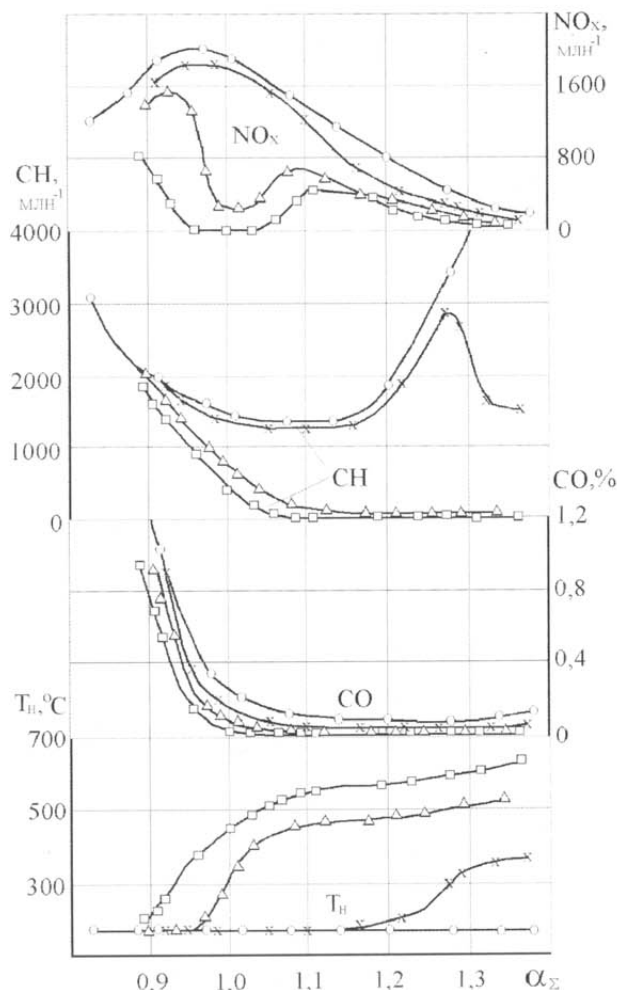


Рис. 2. Регулировочные характеристики выбросов вредных веществ в отработавших газах, температуры нейтрализатора в зависимости от общего коэффициента избытка воздуха и от подвода водорода:

о-о – без подвода H_2 ; х-х – расход $\text{H}_2 = 0,13 \text{ кг/ч}$;
 Δ - Δ – расход $\text{H}_2 = 0,26 \text{ кг/ч}$;
 $\square$ $\square$ – расход $\text{H}_2 = 0,39 \text{ кг/ч}$

Таким образом, проведенные исследования показали, что при работе форкамерного ДВС с каталитическим нейтрализатором на

смесях с коэффициентом ($\alpha_{\Sigma} = 0,95-1,05$ и подводе водорода больше 0,39 кг/ч возможен быстрый прогрев каталитического нейтрализатора до рабочих температур ($T_n \approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$). При этом в нейтрализаторе может быть снижено содержание в отработавших газах CO и NO_x более чем на 95 %, а CH – более чем на 85 %, что может быть использовано для разогрева нейтрализатора при пуске автомобиля согласно требованиям норм ЕВРО-4.

Процесс смесеобразования в форкамерном ДВС

Основные фазы процесса смесеобразования схематично показаны на рис. 3. В форкамерный ДВС поступает топливовоздушная смесь с расходом $G_{B\Sigma}$ и общим коэффициентом избытка воздуха α_{Σ} (рис. 3, а). Бедная смесь с расходом $G_{B\Sigma} - G_{B2}$ и коэффициентом избытка воздуха α_1 через впускной патрубок 2 поступает в цилиндр 1, а богатая смесь с расходом G_{B2} и коэффициентом избытка воздуха α_2 через впускной канал 3 поступает в форкамеру 4, очищая ее от остаточных газов предыдущего цикла. После продувки форкамеры 4 богатая смесь с коэффициентом α_2 поступает в цилиндр 1 через сопловой канал 5 и образует около последнего некий объем 6, где происходит смешивание богатой смеси с коэффициентом α_2 и бедной смеси с коэффициентом α_1 и образование в цилиндре 1 зоны обогащения 7 (рис. 3, б) со смесью промежуточного состава с коэффициентом избытка воздуха α' . При сжатии смесь объемом 8 из зоны обогащения 7 со смесью промежуточного состава с коэффициентом избытка воздуха α' войдет в форкамеру 4 через сопловой канал 5, где, соединяясь со смесью с коэффициентом избытка воздуха α_2 , на любом режиме работы форкамерного ДВС образует к моменту зажигания легко воспламеняемую смесь с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{\phi} = 0,5-0,6$. Другая часть смеси с коэффициентом α' из объема зоны обогащения 7 образует в цилиндре к моменту зажигания гомогенную смесь с коэффициентом избытка

воздуха $\alpha_{\text{ц}}$ (рис. 3, в). В форкамере 4 смесь с коэффициентом $\alpha_{\text{ф}}$ воспламеняется свечой зажигания 9. Факел 9 продуктов сгорания смеси с коэффициентом $\alpha_{\text{ф}}$ поджигает в камере сгорания смесь с коэффициентом $\alpha_{\text{ц}}$, горение которой происходит с исключительной полнотой и устойчивостью (рис. 3, г) [3].

На моторном стенде были проведены исследования с определением оптимального состава смесей с коэффициентами α_1 и α_2 , которые должны поступать в цилиндры и форкамеры для наиболее экономичной работы форкамерного ДВС на различных режимах при минимальном содержании CO , CH и NO_x в отработавших газах.

Изменения расходов богатой смеси G_{B2} , бедной смеси G_{B1} и G_{B3} в общем расходе $G_{B\Sigma}$ в зависимости от частоты вращения n коленча-

того вала ДВС (рис. 4-6), а также изменения оптимальных коэффициентов α_1 , α_2 и α_{Σ} в зависимости от общего расхода $G_{B\Sigma}$ и частоты вращения n коленчатого вала ДВС (рис. 7) показали, что при работе ДВС на режимах холостого хода и малых нагрузках разрежение в цилиндрах максимально и поэтому расход G_{B2} должен быть минимальным (форкамерная заслонка 13 закрыта), поскольку при продувках форкамер богатой смесью с коэффициентом α_2 , смеси с коэффициентом $\alpha_{\text{ф}}$, образуемые в форкамерах к моменту зажигания, могут выходить за пределы воспламенения. При увеличении расхода $G_{B\Sigma}$ уменьшается разрежение в цилиндрах и снижается расход G_{B2} через форкамеры. Для увеличения расхода G_{B2} , а также обеднения смеси с коэффициентом α_2 , поступающей в форкамеры, открывают форкамерную заслонку

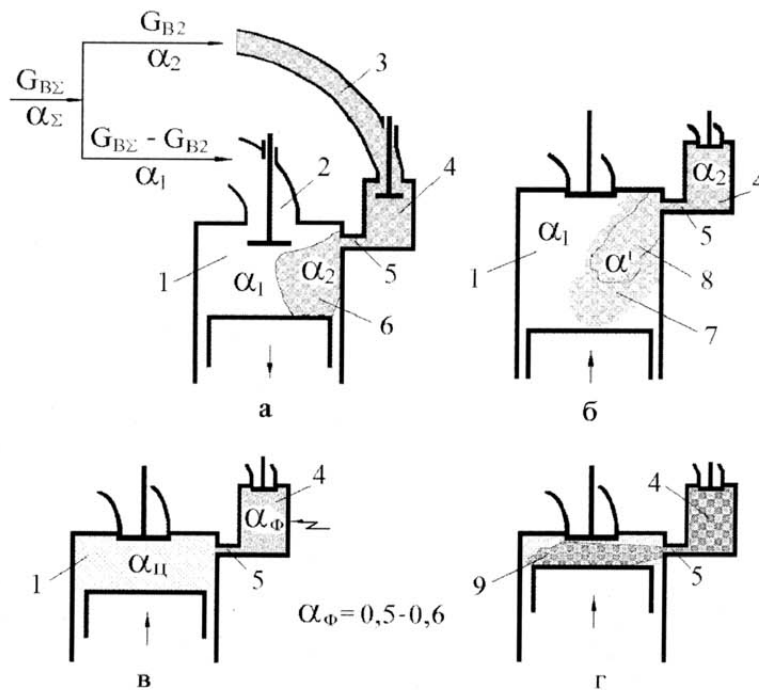


Рис. 3. Схема процесса смесеобразования в форкамерном ДВС:

а – впуск заряда в ДВС; б – начало сжатия; в – зажигание; г – воспламенение бедной смеси в камере сгорания; 1 – цилиндр; 2 – впускной патрубок цилиндра; 3 – впускной канал форкамеры; 4 – форкамера; 5 – сопловой канал; 6 – объем богатой смеси, поступившей из форкамеры в цилиндр при впуске; 7 – объем зоны обогащения; 8 – объем смеси, который поступит из цилиндра в форкамеру при сжатии; 9 – факел продуктов сгорания форкамерной смеси; α_{Σ} , α_1 , α_2 , α' , $\alpha_{\text{ц}}$, $\alpha_{\text{ф}}$ – коэффициенты избытка воздуха в смесях: общий; поступающей в цилиндр; поступающей в форкамеру; промежуточного состава, которая поступает из цилиндра в форкамеру при сжатии; образованной в цилиндре к моменту зажигания в форкамере; образованной в форкамере к моменту зажигания, соответственно

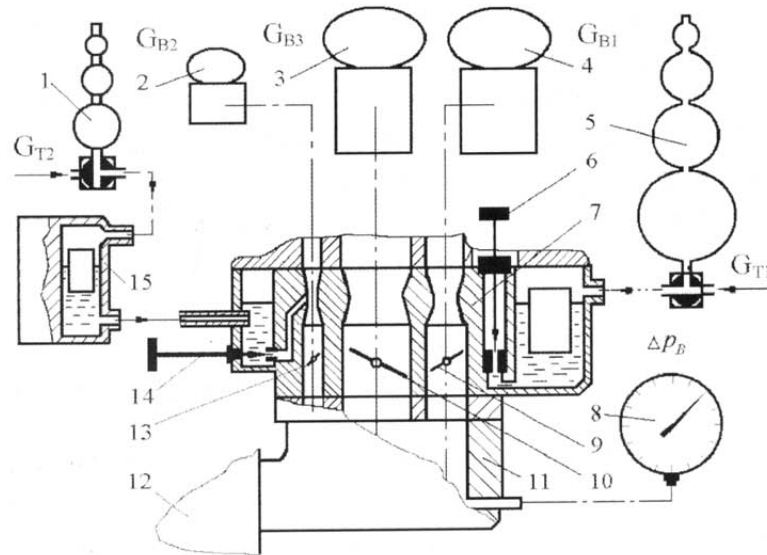


Рис. 4. Схема карбюратора с устройствами для измерения расходов воздуха и топлива, поступающих в ДВС: 1, 5 – штихпроберы для измерения расхода топлива, поступающего в ДВС через форкамеры и цилиндры соответственно; 2, 3, 4 – расходомеры воздуха, поступающего в ДВС через форкамерную, вторичную и первичную дроссельные заслонки карбюратора, соответственно; 6, 14 – регулировочные иглы, для изменения расхода топлива, поступающего в форкамеры и цилиндры соответственно; 7 – карбюратор; 8 – вакуумметр; 9, 10, 13 – первичная, вторичная и форкамерная дроссельные заслонки, соответственно; 11 – впускная труба ДВС; 12 – ДВС; 15 – дополнительная поплавковая камера

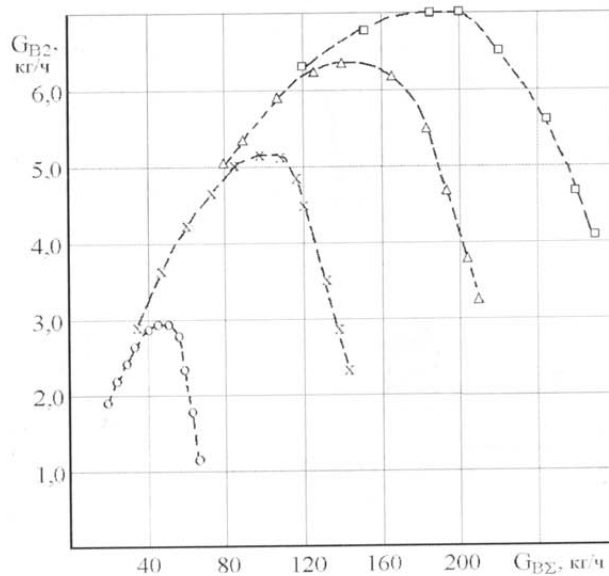


Рис. 5. Изменение расхода G_2 от общего расхода $G_{B\Sigma}$ при частоте вращения n :
о-о – 1000 мин⁻¹; х-х – 2000 мин⁻¹; Δ-Δ – 3000 мин⁻¹; □-□ – 4000 мин⁻¹

ку 13. При этом увеличивается объем зоны обогащения (см. рис. 3), которая необходима для получения к моменту зажигания смеси с коэффициентом $\alpha_\phi = 0,5-0,6$ в форкамерах и для возможности подвода в цилиндры более бед-

ных смесей с коэффициентом α_1 , а ДВС – осуществлять работу на более бедных смесях с коэффициентом α_Σ . Резкое уменьшение расхода G_{B2} наступает при открытии вторичной заслонки 10 (см. рис. 4) карбюратора и поступлении

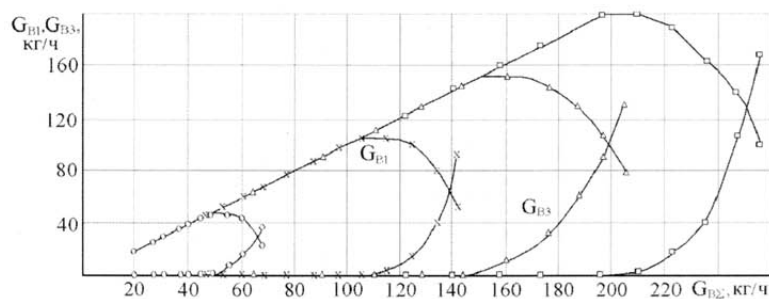


Рис. 6. Изменение расходов G_{B1} и G_{B3} от общего расхода $G_{B\Sigma}$ при частоте вращения n :
о-о – 1000 мин⁻¹; х-х – 2000 мин⁻¹; Δ-Δ – 3000 мин⁻¹; □-□ – 4000 мин⁻¹

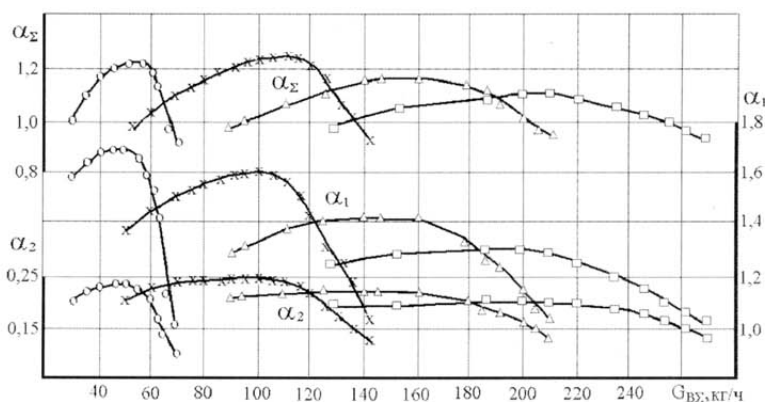


Рис. 7. Изменение оптимальных коэффициентов α_1 , α_2 и α_Σ в зависимости от расхода $G_{B\Sigma}$ и при частоте вращения n : о-о – 1000 мин⁻¹; х-х – 2000 мин⁻¹; Δ-Δ – 3000 мин⁻¹; □-□ – 4000 мин⁻¹

в цилиндры топливоздушная смесь с расходом воздуха G_{B3} (см. рис. 6). С этого момента необходимо обогащать смеси, как с коэффициентом α_1 , так и с коэффициентом α_2 для получения в форкамерах смеси с коэффициентом $\alpha_\phi = 0,5-0,6$ к моменту зажигания, а в камерах сгорания – смеси с коэффициентом α_ψ (см. рис. 3) для эффективной работы ДВС при данном коэффициенте наполнения цилиндров η_v .

При работе ДВС с полностью открытыми дроссельными заслонками расходы G_{B2} минимальны, а смеси с коэффициентом α_2 должны быть наиболее богаты, хотя их получение в карбюраторе К-156 может быть затруднено в связи с малыми расходами G_{B2} .

Недостатком форкамерного ДВС ЗМЗ-4022.10 является то, что при изменении (даже незначительном) частоты вращения вала n или расхода $G_{B\Sigma}$ будет резко изменяться расход G_{B2} , поступающий в форкамеры (см. рис. 5). При

этом будет резко изменяться состав смеси с коэффициентом α_2 , поступающей в форкамеры, поскольку изменение расхода топлива G_{T2} не успевает за изменениями расхода воздуха. Это приводит к сложности получения оптимальных смесей, участвующих в процессе смесеобразования, и их регулирования в условиях работы ДВС, а также является причиной повышенного выброса СН с отработавшими газами. Кроме того, в ДВС ЗМЗ-4022.10 ограничена возможность обеднения смеси с коэффициентом α_2 , что не позволяет существенно улучшить его экономичность и снизить в отработавших газах содержание NO_x .

Совершенствование смесеобразования в форкамерном ДВС

Как уже указывалось ранее, принцип расщепления заряда топливоздушной смеси в цилиндре форкамерного ДВС реализуется пу-

тем продувки форкамеры. При этом способе у соплового канала форкамеры, из-за ограниченных возможностей ее продувки, образуется недостаточный объем обогащенной смеси с коэффициентом избытка воздуха α' (см. рис. 3).

В соответствии с этим желательно было бы расслоить заряд в цилиндре иным способом, а не продувкой форкамеры. Одним из способов является непосредственный впрыск топлива в зону расположения форкамеры при впуске в цилиндр чистого воздуха. Другой способ заключается в подводе в цилиндр расслоенного заряда, при котором обогащенную смесь мощностного состава с коэффициентом $\alpha_1 = 0,8-0,9$ подают к форкамере, а воздух подают в противоположную от форкамеры зону цилиндра. При такой организации смесеобразования в форкамерном ДВС на частичных нагрузках будет эффективно работать часть объема цилиндра, заполненная достаточно обогащенной смесью и, по мере изменения нагрузки, эта часть объема будет увеличиваться или уменьшаться, оставаясь практически постоянной по составу смеси ($\alpha_1 = 0,8-0,9$).

Целесообразность организации такого способа расслоения заряда смеси в цилиндре форкамерного ДВС была проверена теоретически и экспериментальными исследованиями.

Пусть к моменту сжатия (любым способом) в цилиндре форкамерного ДВС был образован расслоенный заряд (рис. 8), который состоит из объема 1 чистого воздуха, объема 2 топливозоо-душной смеси с коэффициентом $\alpha_1 = 0,8-0,9$. Объем 4 обогащенной смеси с коэффициентом α' был образован при продувке форкамеры объемом 3 богатой смеси с коэффициентом α_2 . Пусть объем 1 равен объему V_3 чистого воздуха, объем 2 равен объему V_1 смеси с коэффициентом α_1 достаточно обогащенного состава, а объем 3 равен объему V_2 богатой смеси с коэффициентом α_2 , поступившей в форкамеру при впуске. Тогда объем расслоенного заряда, поступившего в ДВС за один цикл, будет равен:

$$V_{\Sigma} = V_1 + V_2 + V_3; \quad V_i = \frac{G_{Bi}}{\rho_B 30n},$$

а коэффициент расслоения заряда в цилиндре:

$$\xi = \frac{V_3}{V_1} = \frac{G_{B3}}{G_{B1}},$$

где ρ_B – плотность воздуха; i – индекс объема ($\Sigma, 1, 2, 3$).

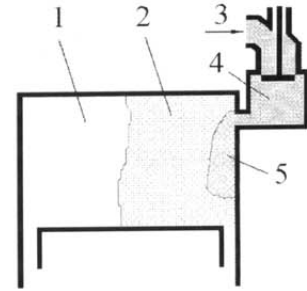


Рис. 8. Расчетная схема форкамерного ДВС с расслоением заряда в цилиндре:

1 – объем воздуха V_3 в цилиндре; 2 – объем смеси V_1 в цилиндре; 3 – объем смеси V_2 в форкамере; 4 – объем V_{ϕ} форкамеры; 5 – объем обогащенной смеси

Для форкамерного ДВС с расслоением заряда в цилиндре расчет смесеобразования может быть проведен по следующим формулам:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \eta_V}{\Omega K \alpha_1 + (\eta_V - \Omega K) \alpha_2}; \quad (1)$$

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \{[\eta_V - \Omega(\epsilon_D - 1)](K+1) - \Omega K(1-\Psi)(1-K\gamma_r)\}}{\alpha_2(K+1)[\eta_V - \Omega(\epsilon_D - 1)] - \Omega(1-\Psi)K[\alpha_2(K+1) - \alpha_1 K(1+\gamma_r)]}; \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \frac{\Psi K^2(1+\gamma_r) \alpha_1}{(\epsilon_D - 1 - \Psi K)(K+1)(\alpha_1 - \alpha') + \Psi K^2(1+\gamma_r) \alpha_1}; \quad (3)$$

$$\alpha' = \frac{\alpha_{\phi} \alpha_2 [(\epsilon_D - 1 - \Psi K)(K+1) + \Psi K^2(1+\gamma_r)]}{\alpha_2(\epsilon_D - 1 - \Psi K)(K+1) + K(1+\gamma_r)[\alpha_2(\Psi K + 1) - \alpha_{\phi}]}; \quad (4)$$

$$\alpha_{\phi} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 [(\epsilon_D - 1 - \Psi K)(K+1) + K(\Psi K + 1)(1+\gamma_r)]}{\alpha_2(\epsilon_D - 1 - \Psi K)(K+1) + \alpha_1 K(\Psi K + 1)(1+\gamma_r)}; \quad (5)$$

$$\Psi = \frac{(\epsilon_D - 1)}{K} \cdot e^{\frac{-6,52(K+1)}{K^2 [1+0,181 \cdot \ln(n \times 10^{-3})]}}; \quad (6)$$

$$\gamma_r = \frac{0,48[(K+1) - (\epsilon - 1)\Omega]}{(\epsilon - 1)[\eta_V(K+1) - \Omega K]};$$

$$\epsilon_D = \frac{2\epsilon}{\left[(1 - \cos \theta) + \frac{R}{8S} (1 - \cos 2\theta) \right] (\epsilon - 1) + 2};$$

$$\Omega = \frac{V_{\phi}}{V_h}; \quad K = \frac{G_{B2}}{V_{\phi} \rho_B 30n}; \quad \eta_V = \frac{G_{B\Sigma}}{V_h \rho_B 30n},$$

где θ – угол опережения зажигания; Ω – относительный объем форкамеры; K – коэффициент продувки; η_V – коэффициент наполнения цилиндров; ϵ_D – действительная степень сжатия;

ψ – коэффициент возврата, который является относительной частью объема, поступившего при впуске в цилиндр из форкамеры и возвратившегося в форкамеру при сжатии; γ_r – коэффициент остаточных газов в цилиндре; n – частота вращения коленчатого вала.

Выражения (1)-(6) получены авторами в процессе исследований. Следует заметить, что по указанным формулам также можно с точностью $\pm 5\%$ провести расчет смесеобразования для ДВС ЗМЗ-4022.10 при коэффициенте $\xi = 0$ (форкамерный ДВС без расслоения заряда).

Теоретические исследования для определения возможности эффективного обеднения смеси с коэффициентом α_Σ и смеси с коэффициентом α_Π при расслоении заряда в цилиндре проводились с учетом конструктивных особенностей форкамерного ДВС ЗМЗ-4022.10 и условия, что в форкамерах к моменту зажигания должна быть образована смесь с коэффициентом $\alpha_\phi = 0,55$ на любом режиме работы.

Теоретические зависимости коэффициентов α_Σ , α_Π , α_2 и α' от коэффициента продувки K при работе форкамерного ДВС с расслоенным зарядом в цилиндре, рассчитанные по формулам (1)-(4) и (6), на режиме с частотой вращения $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $G_{B\Sigma} = 110 \text{ кг/ч}$ ($\eta_v = 0,42$) и $\theta = 18^\circ$ при $\xi = 1$ и $\alpha_1 = 0,85$ показывают, что ДВС с расслоением заряда в цилиндре может работать при практически постоянных коэффициентах $\alpha_\Sigma = 1,35$ и $\alpha_\Pi \approx 1,43$ при изменениях коэффициента K от 2 до 4. При увеличении коэффициента K необходимо обеднять смесь с коэффициентом α_2 , а смеси с коэффициентом α' – обогащать. При $K < 2$ могут быть обеднены смеси с коэффициентом α_Σ , а при $K > 4$ смеси с коэффициентом α_Σ должны обогащаться (рис. 9). Однако несмотря на кажущуюся возможность обеднения смесей с коэффициентом α_Σ при $K \leq 2$ такие регулировки приводят к ухудшению распределения богатой смеси с коэффициентом α_2 по форкамерам и к неустойчивой работе ДВС.

На указанном режиме ДВС ЗМЗ-4022.10 эффективно работал только на смеси с оптимальным коэффициентом $\alpha_\Sigma = 1,07$ (см. рис. 7).

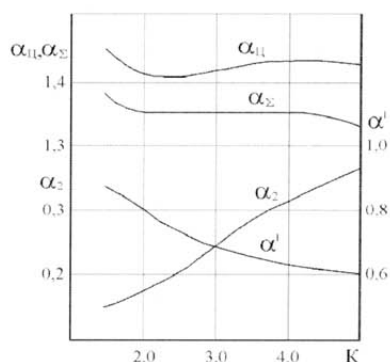


Рис. 9. Расчетные изменения коэффициентов α_Σ , α_Π , α_2 и α' от коэффициента продувки K

В отличие от ДВС ЗМЗ-4022.10, в форкамерном ДВС с расслоением заряда возможно проводить регулирование экономических и мощностных показателей путем изменения коэффициента расслоения заряда в цилиндре ξ .

Изменения коэффициентов $\alpha_\Sigma(\xi)$ и $\alpha_\Pi(\xi)$, рассчитанные по формулам (1)-(2) и (6), при работе ДВС с расслоением заряда в цилиндре на режиме $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $G_{B\Sigma} = 40 \text{ кг/ч}$ ($\eta_v = 0,458$) и $\theta = 3^\circ$ при $K = 3,0$ и $\alpha_1 = 0,85$ показывают, что состав смесей с коэффициентами α_Π и α_Σ можно значительно обеднить путем увеличения коэффициента ξ . Из расчетов следует, что на этом режиме ДВС будет работать с постоянными составами смесей с коэффициентами $\alpha_2 = 0,18$ и $\alpha' = 0,723$. Характеристики показывают, что при коэффициенте $\xi \geq 1,2$ форкамерный ДВС с расслоением заряда в цилиндре может работать на смесях с коэффициентом $\alpha_\Sigma > 1,4$. Здесь следует указать, что при значениях $\xi \leq 0,7$ эффективная работа ДВС ЗМЗ-4022.10 с гомогенным зарядом в цилиндре будет проходить на более бедных смесях с коэффициентом α_Σ по сравнению с ДВС с расслоенным зарядом в цилиндре, что отражает ухудшение условий сгорания расслоенного заряда при работе на богатых смесях с коэффициентом α_Σ (рис. 10).

На указанном режиме ДВС ЗМЗ-4022.10 работал эффективно только на смеси с оптимальным значением коэффициента $\alpha_\Sigma = 1,13$ (см. рис. 7).

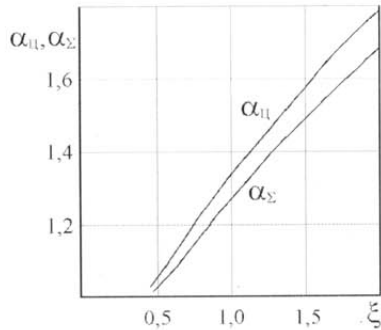


Рис. 10. Изменения коэффициентов α_{Σ} и $\alpha_{и}$ от коэффициента расслоения ξ

Изменения коэффициентов α_{Σ} , $\alpha_{и}$, α_2 и α' от коэффициента α_1 были рассчитаны по формулам (1)-(4) и (6) для ДВС с расслоением заряда на режиме $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $G_{B\Sigma} = 94 \text{ кг/ч}$ ($\eta_v = 0,54$) и $\theta = 14^\circ$ при $K = 3,0$ и $\xi = 1,0$ (рис. 11) и показали, что при обеднении смеси до значения коэффициента $\alpha_1 > 0,8$ ДВС с расслоением заряда в цилиндре может эффективно работать на смесях с коэффициентом $\alpha_{\Sigma} > 1,35$, в то время как ДВС ЗМЗ-4022.10 на этом режиме работал эффективно только на смеси с оптимальным коэффициентом $\alpha_{\Sigma} \leq 1,22$ (см. рис. 7).

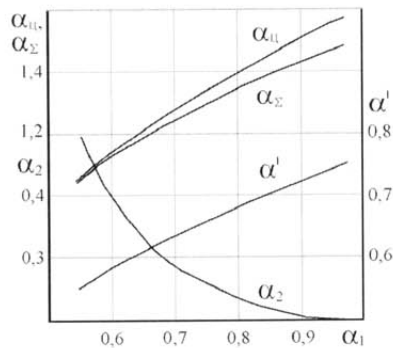


Рис. 11. Изменения коэффициентов α_{Σ} , $\alpha_{и}$, α_2 и α' от коэффициента α_1

Таким образом, проведенные теоретические исследования показали, что форкамерный ДВС с расслоением заряда в цилиндре может работать на существенно более бедных смесях с коэффициентом α_{Σ} по сравнению с форкамерным ДВС с бедным однородным зарядом в цилиндре.

Теоретические возможности улучшения экономических и экологических показателей форкамерного ДВС путем расслоения заряда в цилиндре были проверены экспериментально.

Для этого авторами был модернизирован форкамерный ДВС, принципиальная схема которого показана на рис. 12.

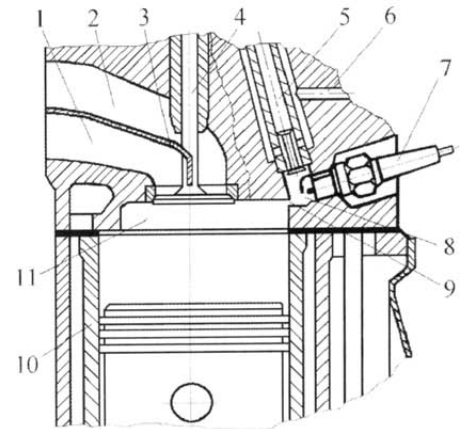


Рис. 12. Схема цилиндра с расслоением заряда топливовоздушной смеси форкамерного ДВС:
1 – канал для подвода чистого воздуха в цилиндр;
2 – канал для подвода смеси с α_1 в цилиндр;
3 – перегородка; 4 – впускной клапан цилиндра;
5 – впускной клапан форкамеры; 6 – канал для подвода богатой смеси с α_2 в форкамеру;
7 – свеча зажигания; 8 – форкамера;
9 – сопловой канал форкамеры; 10 – цилиндр;
11 – камера сгорания

При работе ДВС в цилиндр 10 поступает расслоенный заряд. По впускному патрубку 1 поступает свежий воздух с расходом G_{B3} , который с помощью перегородки 3 и тарелки впускного клапана 4 направляется в зону цилиндра 10, противоположную от форкамеры 8. По впускному патрубку 2 в цилиндр 10 поступает смесь с коэффициентом $\alpha_1 = 0,8-0,9$ и расходом G_{B1} , которая с помощью тарелки впускного клапана 4 направляется в зону расположения сопловых каналов 9 форкамеры 8. Богатая смесь с расходом G_{B2} и коэффициентом α_2 поступает в форкамеру 8 и ее продувает. При сжатии часть смеси с коэффициентом α_1 поступает обратно в

форкамеру, где при смешении со смесью с коэффициентом α_2 к моменту зажигания образуется смесь с коэффициентом α_ϕ , а в камере сгорания 11 – расслоенный заряд с коэффициентом α_ψ . Свечой зажигания 7 поджигается смесь с коэффициентом α_ϕ и продуктами ее сгорания через сопловой канал 9 воспламеняется расслоенный заряд в камере сгорания 11 [4].

Разработка, изготовление и исследования опытного форкамерного ДВС с подводом в цилиндр расслоенного заряда смеси проводилась совместно с ЗМЗ [5].

Для работы с расслоением заряда в цилиндре в базовый полноразмерный форкамерный ДВС ЗМЗ-4022.10 были внесены следующие изменения.

1. Впускная труба заменена на модифицированную впускную трубу с отдельными каналами для подвода в цилиндр расслоенного заряда смеси, которая была изготовлена на ЗМЗ (рис. 13). Один из каналов был соединен с первичной камерой карбюратора К-156 для подвода в ДВС обогащенной смеси с коэффициентом α_1 , а другой канал был соединен со вторичной камерой карбюратора для подвода в цилиндр чистого воздуха [6].

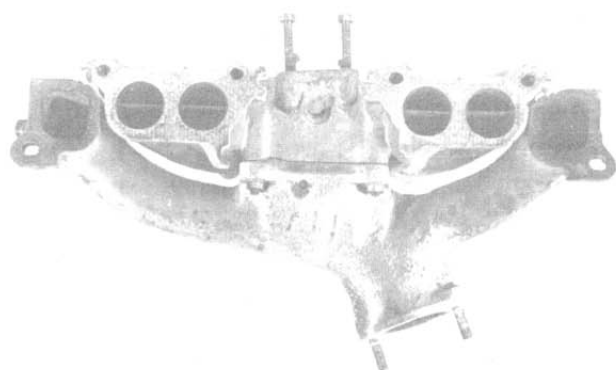


Рис. 13. Вид на впускную трубу со стороны головки цилиндров

2. В головку цилиндров (рис. 14) были установлены перегородки, делящие впускной патрубок каждого цилиндра на два канала приблизительно равного проходного сечения и доходящие до тарелки впускного клапана (см. рис. 12).

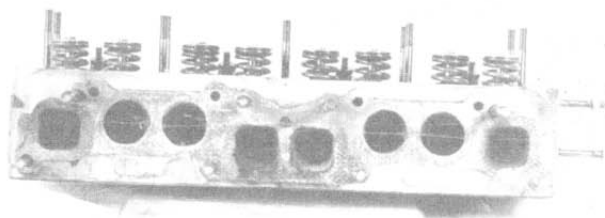


Рис. 14. Вид на головку цилиндров со стороны впускной трубы

Для подвода расслоенного заряда к цилиндрам форкамерного ДВС в карбюратор К-156 были внесены конструктивные изменения:

а) заглушены жиклеры, подводящие топливо во вторичную камеру карбюратора;

б) привод первичной и вторичной дроссельных заслонок был заменен рычагом с профильной опорной поверхностью, который был укреплен на вторичной заслонке; профиль контактной поверхности привода был выполнен так, чтобы расходы воздуха G_{B1} и G_{B2} , поступающие в цилиндры ДВС через первичную и вторичную дроссельные заслонки, были одинаковыми ($\xi = 1,0$), кроме работы ДВС по внешней скоростной характеристике (кривая максимальной мощности в зависимости от частоты вращения, которую получают при полностью открытых дроссельных заслонках карбюратора).

Сравнительные исследования базового форкамерного ДВС ЗМЗ-4022.10 и опытного форкамерного ДВС с расслоением заряда в цилиндре проводились на моторном стенде с одним и тем же оборудованием и по одной и той же методике. В сравниваемых форкамерных ДВС были одинаковые головки цилиндров и блок цилиндров, а значит степени сжатия и механические потери. Сравнительные регулировочные характеристики в зависимости от коэффициента α_2 (рис. 15) при работе форкамерных ДВС при частоте вращения вала $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $\theta = 14^\circ$ и $\eta_v = 0,56$ получали путем изменения расхода топлива в смеси с коэффициентом α_1 при постоянном составе смеси с $\alpha_2 = 0,23$, поступающей в форкамеры.

В опытном ДВС с подводом в цилиндр расслоенного заряда расход воздуха G_{B2} умень-

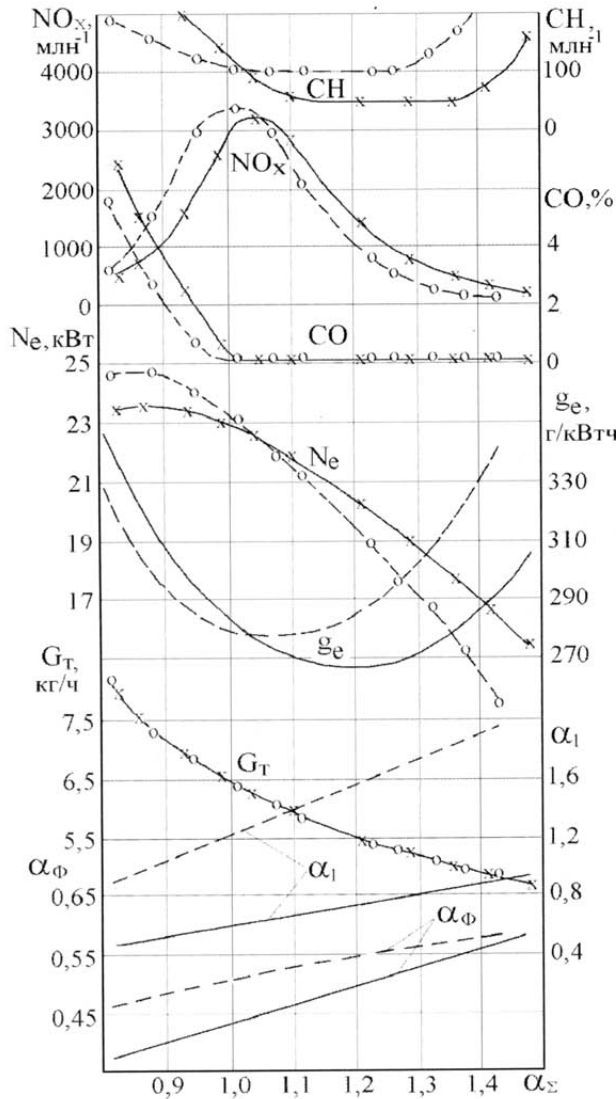


Рис. 15. Сравнительные регулировочные характеристики ДВС в зависимости от коэффициента α_z :

о-о – базовый ДВС ($G_{B2} = 5,14$ кг/ч);
х-х – опытный ДВС ($G_{B2} = 3,47$ кг/ч)

шился по сравнению с расходом G_{B2} в базовом ДВС с подводом в цилиндр гомогенного заряда. Это объясняется тем, что при равных значениях коэффициента η_v в опытном ДВС первичная заслонка была открыта на меньший угол по сравнению с базовым ДВС. Соответственно на меньший угол открывалась и форкамерная заслонка, поскольку она по отношению к первичной заслонке в обоих случаях не изменяла своего положения.

При работе на смесях обогащенного состава базовый ДВС обладает на 5-6 % большей

мощностью N_e и меньшим удельным эффективным расходом топлива g_e по сравнению с опытным ДВС. При этом в отработавших газах базового ДВС больше содержание NO_x , но меньше содержание CO и CH . При обеднении смеси с коэффициентом α_1 , а, следовательно, и смеси с коэффициентом α_z до значения $\alpha_z \approx 1,05$, мощность N_e , содержание CO , CH , NO_x , и удельный расход топлива g_e в сравниваемых ДВС выравниваются. При дальнейшем обеднении смеси с коэффициентом α_1 опытный ДВС работает с лучшими показателями N_e и g_e , а также с меньшим содержанием CH в отработавших газах.

Содержание CO в отработавших газах при работе испытуемых ДВС на смесях с коэффициентом $\alpha_z > 1,05$ приблизительно одинаково и находится в пределах 0,1-0,15 %.

Предел эффективного обеднения наступает при работе базового ДВС на смеси с коэффициентом $\alpha_z \approx 1,23$ при подводе в цилиндры гомогенной смеси с коэффициентом $\alpha_1 = 1,6$. Предел эффективного обеднения наступает при работе опытного ДВС на смеси с коэффициентом $\alpha_z \approx 1,37$ и при подводе к форкамерам смеси с коэффициентом $\alpha_1 = 0,83$. При работе на пределе эффективного обеднения опытного ДВС содержание NO_x в отработавших газах меньше на 30%, а удельный расход топлива g_e – на 10% по сравнению с базовым ДВС. При этом содержание CH в опытном ДВС меньше на 40-50%, что объясняется меньшим перепадом расходов G_{B2} . На этом режиме был проведен расчет по формуле (5) коэффициента α_ϕ у сравниваемых ДВС.

Результаты расчетов, представленные на рис. 15 в виде зависимости $\alpha_\phi = f(\alpha_z)$, показали, что снижение максимальной мощности N_e у ДВС с подводом в цилиндр расслоенного заряда при работе на смесях мощностного состава объясняется как переобогащением смеси с коэффициентом α_ϕ в форкамерах, так и малой скоростью сгорания в цилиндрах в связи с переобогащением смеси с коэффициентом α_1 . В опытном ДВС при обеднении смеси с коэффициентом α_1 обедняется и смесь с ко-

эффицентом α_ϕ , что улучшает сгорание как в форкамерах, так и в цилиндрах. При работе сравняемых ДВС на пределе эффективного обеднения минимальным значениям содержания СН в отработавших газах соответствуют смеси с коэффициентом $\alpha_\phi \approx 0,55$, что согласуется с результатами теории горения в форкамерном ДВС [3].

Заклучение

Проведенные исследования показали следующее:

- автомобиль с форкамерным ДВС имеет лучшие экономические и экологические показатели по сравнению с автомобилем с обычным искровым ДВС, как без каталитического нейтрализатора отработавших газов, так и с нейтрализатором;
- каталитический нейтрализатор, установленный в системе выпуска автомобиля «Волга» с форкамерным ДВС, увеличивает расход топлива автомобиля приблизительно на 10 %, но снижает содержание в отработавших газах СО и СН более чем в 9 раз, а NO_x – в 3 раза;
- при работе форкамерного ДВС на смеси с коэффициентом $\alpha_\Sigma = 0,95-1,05$ и подводе водорода с расходом 0,3-0,4 кг/ч можно быстро нагреть каталитический нейтрализатор до рабочего режима ($T_n > 300^\circ\text{C}$) и снизить в отработавших газах выбросы СО и NO_x более чем на 95 %, а выбросы СН – более чем на 80 %, что может быть использовано при пуске автомобиля согласно требованиям норм ЕВРО-4;
- опытный форкамерным ДВС с подводом в цилиндр расслоенного заряда имеет на 10 % лучшие экономические показатели при снижении в отработавших газах содержания NO_x на 30 % и СН на 40-50 % по сравнению с базовым форкамерным ДВС;

- показатели мощности опытного форкамерного ДВС с расслоением заряда в цилиндре на 5-6 % меньше показателей мощности ДВС ЗМЗ-4022.10, что объясняется переобогащением смесей, образованных как в расслоенном заряде цилиндра, так и в форкамерах.

Список литературы

1. Кузнецов И.В. Исследование форкамерного ДВС с каталитическим нейтрализатором в качестве малотоксичной силовой установки для автомобиля «Волга» // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС / Материалы VII Межд. научн.-практ. семинара. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та. 1999. С. 94-95.
2. Кузнецов И.В. Снижение токсичности отработавших газов форкамерного ДВС при использовании каталитического нейтрализатора // Двигатель – 97 / Материалы Междунар. научн.-тех. конф. – М.: МГТУ, 1997. С. 37-38.
3. Гуссак Л.А. Новый принцип воспламенения и горения в двигателях // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1965. № 12. С. 3-5.
4. А.с. № 1280149 СССР, МКИ F 02 В 17/00. Двигатель внутреннего сгорания / И.В. Кузнецов, В.А. Куцевалов, О.И. Жегалин и др. // Открытия. Изобретения. 1986. Бюл. № 48. С. 127.
5. Кузнецов И.В. Сравнительные исследования форкамерного ДВС с подводом в цилиндр го-могенного и расслоенного заряда // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей / Материалы IX Междунар. научн.-практ. конф. Владим. гос. ун-та. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2003. С. 296-298.
6. А.с. № 1110916 СССР, МКИ F 02 В 29/00. Впускной трубопровод двигателя внутреннего сгорания / О.И. Жегалин, А.А. Калашников, И.В. Кузнецов и др. // Открытия. Изобретения. 1984. Бюл. № 32. С. 97-98.